Verfahren der objektiven Prüfung und Messung der Hörfähigkeit oder Hörschwelle.

Von

Fritz Lux

zurzeit wissenschaftl. Hilfsarbeiter an der kgl. bakteriolog. Untersuchungs-
station Landau (Pfalz).

(Mit 8 Textfiguren.)

Wenn wir irgend eine Grösse Q messen wollen, so stellen wir sie in quantitativen Vergleich zu einer Einheitsgrösse E . Die Einheitsgrösse muss jedoch so beschaffen sein, dass sie uns zu jeder Zeit und an jedem Ort unveränderlich zur Verfügung steht. Nur dann können Messungen gleichmässig ausfallen.

Unsere allgemein benutzten Maasse und Maasseinheiten lassen sich jeweils aus den sogenannten drei Urmaassen, nämlich: Zentimeter, Gramm und Sekunde bilden. Auf Grundlage dieser und mit Zuhilfenahme gewisser, jedoch genau definierbarer Hilfsmittel, wie zum Beispiel mechanischer Konstruktionen, Chemikalien usw., stellen wir uns dann gebrauchsfähige und leicht zu handhabende Maasseinheiten und Messinstrumente her. Als solche seien beispielsweise die „Atmosphäre“ als Einheit für Druck- und die „Hefner-Kerze“ als Einheit für Lichtmessungen genannt.

Trotz vielfacher Bemühungen ist es nun aber bisher nicht oder nur unvollständig gelungen, eine handliche Maasseinheit oder ein auf einer solchen aufgebautes Messinstrument für den Gebrauch in der Akustik herzustellen. Erschwert wird dies besonders dadurch, dass die Definition eines bestimmten Tones von zwei Faktoren abhängig ist: nämlich von der Schwingungszahl und von der Schwingungsweite (Amplitude).

Wir müssen also eine Tonquelle besitzen, die uns konstant vollkommen reine Töne von bestimmter Höhe und Stärke gibt, und ausserdem muss sie so beschaffen sein, dass ihre Teile genau aus-

gemessen und ohne Unterschied hinsichtlich ihrer Wirkung jederzeit wieder hergestellt werden kann. Besonders wichtig für vergleichende Messungen unseres Gehörorgans ist auch, dass diese Tonquelle alle Töne und Tonstärken innerhalb unseres Hörvermögens zu liefern vermag.

Bevor ich auf die Beschreibung meines neuen Verfahrens näher eingehe, sei kurz beschrieben, wie man bisher das erwähnte Ziel zu erreichen versucht und welcher Methoden man sich zur Gehörprüfung bedient hat und noch bedient.

Die am meisten geübte und heute noch hauptsächlich in Benutzung stehende Methode ist diejenige unter Benutzung der Flüsterstimme. Der untersuchende Arzt spricht bestimmte Worte oder Zahlen in Flüsterstimme und stellt die Entfernung fest, in der sie von der zu untersuchenden Person noch verstanden werden. Diese primitive Methode enthält eine Unmenge von Fehlerquellen. Vor allem: Was versteht der einzelne unter Flüsterstimme? Der Militärarzt zum Beispiel, der gewöhnt ist viel zu kommandieren, wird noch als Flüsterstimme bezeichnen, was ein anderer schon eine recht laute Stimme nennt! Andererseits hat der eine Arzt eine tiefe und der andere eine hohe Stimme. Dies ist aber keineswegs gleichgültig, da die Hörschärfe und Hörschwelle in den verschiedenen Tonlagen bei fast jedem Menschen verschieden sind. Es kommt aber bei dieser Methode auch auf den Raum an, in dem die Prüfung vorgenommen wird. Es spielt sowohl die Grösse als auch dessen Akustik eine grosse Rolle. Erst kürzlich wurde in medizinischen Zeitschriften auf die Übelstände dieser Methode hingewiesen, wobei erwähnt wurde, dass sogar die krassen Fälle vorkamen, dass Leute, die effektiv schlecht hörten, als dienstfähig bezeichnet und guthörende entlassen wurden. Auch wird auf diese Weise mancher fälschlicherweise der Simulation beschuldigt.

Um die Missstände der genannten Methode zu vermeiden und eine Tonquelle zu schaffen, die die menschliche Stimme ersetzt, konstruierte Hughes folgenden Apparat (Fig. 1):

E ist eine Stromquelle, die den Induktionsapparat J speist. Der Strom des Elementes E wird dabei von einem Selbstunterbrecher rhythmisch unterbrochen und durch diese Stromstösse wird in der Sekundärwicklung der Induktionsspule ein Wechselstrom erzeugt. Dieser Wechselstrom wird zu der Spule S und der entgegengesetzt gewickelten Spule S_1 , mit weniger Windungen als Spule S , geleitet.

Die Spule S_2 besitzt die gleiche Windungszahl wie die Spule S und ist mit einem Telephonhörer T verbunden.

Die Spulen S und S_1 induzieren also Ströme in der Spule S_2 . Da aber die Wickelungen der Spulen S und S_1 einander entgegengesetzt sind, so heben sich ihre Wirkungen in einer bestimmten Entfernung voneinander auf. Bringt man die verschiebbare Spule S_2 an diese Stelle, so wird in ihr kein Strom induziert, und der Telephonhörer T gibt keinen Ton. Je mehr man aber die Spule S_2 der Spule S nähert, desto stärker wird der induzierte Strom und damit auch der Ton des Telephonhörers. Vorausgesetzt, dass die

Fig. 1.

Spannung und Stromstärke der Stromquelle E , der Zustand der Kontakte des Selbstunterbrechers und die Spannung der Feder des letzteren konstant blieben, hätte man in der Entfernung der Spulen S und S_2 voneinander ein Maass für die Tonstärke des Telephonhörers für einen Ton bestimmter Höhe. Dies ist jedoch in der Praxis niemals zu erreichen. Die nähere Erörterung der Gründe würde hier zu weit führen.

Besonders intensiv hat sich Bezold mit der Messung der Hörfähigkeit beschäftigt, der dabei in der Herstellung der nötigen Instrumente von Prof. Dr. M. Th. Edelmann in München unterstützt wurde. Bezold und Edelmann verwendeten zu ihrem Verfahren, das auch heute noch von den Ohrenärzten fast ausschliesslich benutzt wird, Stimmgabeln und die Galtonpfeifen. Bei diesem Verfahren liegt von vornherein eine grosse Umständlichkeit darin, dass

man fast für jeden Ton eine besondere Stimmgabel oder Pfeife braucht. Ferner liegt eine grosse Behinderung in der Anwendung dieses Verfahrens, dass man, besonders bei den Stimmgabeln, einen Ton nicht längere Zeit konstant erhalten kann. Und wenn man auch so Töne von bestimmter und genau bekannter Höhe erhält, so kann man das Maass ihrer Stärke nur indirekt ermitteln.

Angeregt durch diese Arbeiten hat nun Edelmann versucht eine Normaltonquelle herzustellen, bei der Tonhöhe und Tonstärke messbar festzustellen sind. Und dies ist ihm in sehr vollkommener

Fig. 2.

Weise gelungen. Nur ist leider die Handhabung des Instrumentariums zu schwierig, als dass sich die Methode in der Hand des praktischen Ohrenarztes verwenden liesse.

Da dieser Apparat aber gewissermaassen, wenn ich auch vorher keine Kenntnis von ihm hatte, der Vorläufer meines Apparates ist, so sei derselbe hier kurz beschrieben.

Edelmann verwendet bei seiner Methode eine Sirene. Nach Überwindung grosser technischer Schwierigkeiten gelang es ihm, die in der Fig. 2 dargestellte Sirene herzustellen, die bei ihrem Lauf allein keinen Ton von sich gibt, d. h. völlig ton- und geräuschlos läuft.

Auf der Achse *D* mit der Nabe *N* sitzen die drei Drahtspeichen *C*, die den Radkranz *R* mit einer Reihe von Löchern tragen. Die Achse *D* wird mittels der Schnur *d* von einem Elektromotor angetrieben. *K* ist eine Windlade mit drei Rohransätzen. Durch das

Rohr P wird der Windlade K Luft unter Druck zugeführt. Das Rohr M führt zu einem Manometer und r ist das Blasrohr, das den Luftstrom gegen die Lochreihe des Radkranzes R führt.

In gleicher Achse mit dem Blasrohr r , jedoch auf der anderen Seite des Radkranzes R befindet sich das Rohr H mit der trichterartigen Erweiterung a . Über das Ende dieses Rohres wird ein Gummischlauch gesteckt, der in den äusseren Gehörgang des zu prüfenden Ohres eingeführt wird.

Fig. 3.

Fig. 4.

Wenn nun der Radkranz R rotiert und gegen ihn aus dem Rohr r Luft geblasen wird, so entsteht ein Ton, der durch den Trichter a , das Rohr H und den Gummischlauch dem Ohr zugeführt wird. Die Höhe des Tones ist abhängig von der Umdrehungszahl des Radkranzes R , die durch ein Tachometer leicht festgestellt werden kann. Die Tonstärke jedoch ist abhängig von dem Druck, mit dem die Luft aus der Windlade K gegen die Lochreihe geblasen wird. Und wie wir im Folgenden sehen werden, ist gerade die genaue Bestimmung dieses Druckes mit grossen Schwierigkeiten verknüpft.

Edelmann verwendete hierzu zunächst ein in der Fig. 3 und 4 dargestelltes Flüssigkeitsmanometer mit Fernrohablesung.

Ein U-förmiges Rohr G ist mit einer Teilung M versehen und teilweise mit Wasser gefüllt. Der Schlauchansatz S ist durch einen Gummischlauch mit der Windlade K verbunden. Die durch den

Druck entstehende Verschiebung der Wassersäule wird durch einen Fernrohrapparat (Fig. 4) abgelesen. Mit diesem Apparat lässt sich der Luftdruck mit einer Genauigkeit von 0,02 mm bestimmen.

Diese Genauigkeit ist jedoch zur Bestimmung des Hörvermögens bei der ausserordentlichen Empfindlichkeit unseres Ohres völlig un-

genügend. Zu diesem Zweck müssen wir vielmehr Drucke von weniger als 0,01 mm Wassersäule mit einer Genauigkeit von 0,0001 mm messen können.

Zu diesem Zweck konstruierte Edelman das in der Fig. 5 dargestellte Luftdruckmikrometer. An einem Kokonfaden *S* ist ein Glimmerblättchen *B* befestigt. Steif mit diesem verbunden ist der Spiegel *P* und das zylindrische Kupferstück *K*, das als Dämpfung zwischen den Polen des Magneten *M* hängt. Das Glimmerblättchen *B* befindet sich innerhalb des Zylinders *A* aus Glas. Durch eine Bohrung dieses Zylinders führt das Rohr *D*, das mit einem Mundstück gegen das Glimmerblättchen gerichtet ist.

Fig. 5.

Das Rohr *D* ist durch einen Schlauch mit der Windlade *K* (Fig. 2) verbunden. Die aus dem Mundstück des Rohres *D* ausströmende Luft verdreht das Glimmerblättchen entsprechend ihrem Druck und die Verdrehung wird durch den Spiegel *P* mittels eines Lichtstrahles, wie bei einem Spiegelgalvanometer, an einer Teilung abgelesen.

Dieses Instrument wird zunächst bei grösseren Drücken mit dem schon beschriebenen Flüssigkeitsmanometer geeicht.

Zur Bestimmung der Hörschwelle eines Ohres verfährt man folgendermaassen:

Man lässt zunächst den Radkranz der Sirene mit einer bestimmten Umdrehungszahl laufen, die einem bestimmten Ton entspricht. Sodann lässt man die Luft aus dem Blasrohr r mit solchem Druck ausströmen, dass ein hörbarer Ton entsteht. Nun vermindert man den Druck so lange, bis der Ton für das zu prüfende Ohr erlischt und liest in diesem Augenblick den Druck am Luftdruckmikrometer ab. Dieser Wert wird zusammen mit der Schwingungszahl (Tonhöhe) des betreffenden Tones notiert. Auf gleiche Weise verfährt man durch die ganze Tonleiter hindurch.

Es sei hier eine Messung an den Ohren Edelmann's wiedergegeben, wobei die Zahlen den Druck in Millimeter Wassersäule darstellen.

	G_2	C_1	C	c	c^1	c^2	c^3	g^3
Linkes Ohr . . .	0,20	0,074	0,0309	0,0352	0,0342	0,12	0,18	0,52
Rechtes Ohr . . .	0,28	0,121	0,0402	0,0402	0,0360	0,095	0,12	0,30

Es ist wohl aus dem Vorstehenden ersichtlich, dass die Methode Edelmann's an sich einwandfrei und zweckmässig ist, dass sie jedoch einer Messvorrichtung für den Luftdruck bedarf, die an einen Ohrenarzt zu grosse Ansprüche stellt; diese machen auch das ganze Instrumentarium ungeeignet, um an beliebigen Orten stets gleich gebrauchsfähig zu sein.

Der Vollständigkeit halber seien hier noch die Methoden von Wien, Baltzmann, Töpler, Lord Rayleigh u. a. erwähnt, die jedoch alle mehr oder weniger nur rein wissenschaftliches Interesse haben.

(Literatur: Edelmann, Leitfaden der Akustik für Ohrenärzte; Wundt, Physiologische Psychologie Bd. 1 S. 648 ff. und A. Winkelmann, Handbuch der Physik Bd. 2 S. 246 ff.)

Ich war nun bestrebt eine Methode der objektiven Messung der Hörfähigkeit zu ermitteln, die einerseits den wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht wird und andererseits auch leicht von jedem Ohrenarzt gehandhabt werden kann.

Grundlegend verwende ich den schon von Hughes vorgeschlagenen und auch von Wien mit Erfolg benutzten Telephonhörer als Tonquelle. Als solche hat der Telephonhörer den grossen Vorteil, dass er das Ohr gegen äussere Geräusche abschliesst und sich auch jeweils, praktisch gesprochen, in gleicher Entfernung vom Ohre befindet. In dem Telephonhörer wird eine Membrane (zum Beispiel dünnes Eisenblech) unter dem Einfluss eines Wechselstromes,

der einen Elektromagneten durchfließt, zum Schwingen gebracht und dadurch ein Ton erzeugt. Die Höhe des Tones ist dabei durch die Wechselzahl des verwendeten Wechselstromes und die Tonstärke durch die Stärke des Stromes bedingt. Wesentlich ist dabei aber noch, dass man Wechselstrom von reiner Sinusform anwendet, da ein reiner Ton nur durch sinusförmige Schwingungen hervorgerufen wird.

Schnitt A-B

Fig. 6.

Es war also in der Hauptsache die Aufgabe gestellt einen reinen sinusförmigen Wechselstrom zu erzeugen, der in der Wechselzahl und Stärke in weiten Grenzen veränderlich ist und bei dem sowohl Wechselzahl als auch Stromstärke genau messbar sind.

Ersteres ist analog der Edelmann'schen Sirene nicht schwierig, letzteres dagegen um so mehr, da wir für sehr schwache Wechselströme, wie sie hier in Betracht kommen, keine genügend genaue und handliche Messinstrumente besitzen.

Ich schlug daher folgenden Weg ein, der in der Fig. 6 schematisch dargestellt ist.

a ist ein kleiner Elektromotor, der die Scheibe b in Umdrehung versetzt. Nahe ihrem Umfang sind eine Reihe von beispielsweise 20 Spulen aufgesetzt, die alle die gleiche Drahtwindungszahl besitzen und jeweils untereinander entgegengesetzt verbunden sind, so dass ein sie hintereinander durchfließender Gleichstrom auf der einen Seite der Scheibe b abwechselnd Nord- und Südpole erzeugen würde. Die Stromzuführung zu diesen Spulen erfolgt durch die Schleifbürsten d und e . Ausserhalb der Scheibe b sind feststehend die Spulen l und m angebracht, die unter sich ebenfalls gleiche Windungszahl besitzen. Zwischen diesen Spulen l und m rotieren die Spulen c hindurch. Sämtliche Spulen sind völlig frei von Eisenteilen.

Wird nun durch die Spulen l und m ein Gleichstrom geleitet, so erzeugt dieser zwischen ihnen ein Magnetfeld von entsprechender Stärke. Sobald aber die Spulen c bei ihrer Umdrehung dieses Magnetfeld schneiden, wird in ihnen jeweils ein Stromimpuls erzeugt, der sinusartig ansteigt und abfällt. Dies erfolgt bei jeder Spule und zwar besitzt jeder Impuls entgegengesetztes Vorzeichen, da die Spulen einander entgegengesetzt geschaltet sind. Wenn daher die Scheibe b eine Umdrehung in der Sekunde macht, so erhält man einen Wechselstrom von zwanzig Wechseln oder zehn Perioden in der Sekunde. (Eine Periode ist eine ganze Schwingung.)

Die Wechselzahl des so erzeugten Wechselstromes lässt sich daher ohne weiteres durch die Messung der Umdrehungszahl der Scheibe mittels eines Tachometers feststellen, womit zugleich die Höhe des im Telephonhörer erzeugten Tones gegeben ist! Es kommt jetzt also nur noch darauf an, auch die Stärke des erzeugten Stromes festzustellen.

Wovon ist dieser nun abhängig? Er ist abhängig von der Winkelgeschwindigkeit der Spulen c , der Windungszahl der Spulen c , l und m , dem Abstand der Spulen c von den Spulen l und m und von der Stärke des durch die Spulen l und m erzeugten Magnetfeldes, das wieder von der Stärke des zugeführten Gleichstromes abhängig ist. Dies ist in der folgenden Formel ausgedrückt:

$$E = \frac{ts \cdot S \cdot N}{10^8} = \frac{w}{2\pi} \cdot S \cdot N \cdot 10^{-8}$$

ts = Touren pro Sekunde, S = Kraftlinienzahl durch die Ankerspulen, N = Windungszahl, w = Winkelgeschwindigkeit.

Von diesen Faktoren bleiben aber für jede bestimmte Wechselzahl des erzeugten Wechselstromes alle konstant bis auf eine. Es ist nämlich für jede bestimmte Wechselzahl die Winkelgeschwindigkeit der Spulen c gleich, ferner ist die Windungszahl aller Spulen und

Fig. 7.

auch ihre Abstände voneinander unveränderlich. Als einziger veränderlicher Faktor bleibt daher die Stärke des den Spulen l und m zugeführten Gleichstromes.

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Formel ist daher die Stärke des auf diese Weise erzeugten Wechselstromes durch die Stärke des zugeführten Gleichstromes gegeben. Da wir aber selbst für die schwächsten hier in Betracht kommenden Gleichströme ohne weiteres leicht zu handhabende Präzisionsmessinstrumente (Despretz-d'Arsonval) besitzen, so ist es leicht, auf diese Weise die dem Telephonhörer zugeführten Wechselströme genau zu messen. Wir haben also in dem Maass des zugeführten Gleichstromes ein Maass für die Stärke des im Telephonhörer erzeugten Tones.

Die Fig. 7 zeigt nun den fertigen Apparat; a ist der kleine Antriebselektromotor, b die rotierende Scheibe mit den aufgesetzten Spulen, c das Tachometer zur Messung der Umdrehungszahl und damit der Tonhöhe. Das Tachometer zeigt hier zweckmässig anstelle der Umdrehungszahl gleich die Schwingungszahl des betreffenden Tones oder dessen musikalische Bezeichnung, also zum Beispiel C_1 , C , c , c^1 , c^2 usw., an.

d ist eine Vorrichtung, die den dem Telephonhörer zugeführten Strom von Zeit zu Zeit, etwa alle 5 Sekunden, auf die Dauer von

Fig. 8.

5 Sekunden unterbricht. Dies ist erforderlich, da unser Ohr für schwache, konstant dauernde Töne leicht ermüdet, wodurch die Genauigkeit der Messung beeinträchtigt werden würde.

Unter Zugrundelegung des Schemas nach Fig. 6 verfährt man nun zur Bestimmung der Hörschwelle folgendermaassen: Man lässt durch Benutzung des Regulierwiderstandes k zunächst den Elektromotor mit einer Geschwindigkeit laufen, die zum Beispiel dem Ton C_1 entspricht. Während der zu Prüfende den Telephonhörer am Ohre hat, schickt man nun unter Benutzung des zweiten Regulierwiderstandes h einen Gleichstrom durch die feststehenden Spulen.

Diesen verstärkt man so lange, bis der zu Prüfende den Ton hört; dann liest man die Stärke des Stromes ab. Auf die gleiche Weise verfährt man durch die ganze Tonleiter hindurch.

Die erzielten Ergebnisse trägt man zweckmässig in ein Koordinatensystem ein, wodurch man dann eine bestimmte Kurve erhält, wie dies beispielsweise die Fig. 8 zeigt.

Um sich nun gleich ein richtiges Bild von der Hörfähigkeit des zu prüfenden Ohres machen zu können, wird es gut sein zum Eintragen der Kurven Vordrucke zu benutzen, in denen eine Kurve eingedruckt ist, die dem Mittel aus mehreren durchschnittlich sogenannten normalen Ohren entspricht. Es kann dann zum Beispiel die Kurve des zu prüfenden Ohres parallel mit der vorgedruckten Kurve verlaufen, aber unter oder über ihr liegen. Sogenannte „Gehörlücken“ oder Stellen der Tonskala, bei denen Gehördefekte oder herabgesetzte Gehörfähigkeit vorhanden, sind dann sofort ersichtlich.

Eine Simulation bei der Gehörprüfung nach diesem Verfahren wird kaum möglich sein. Wenn man zum Beispiel auf diese Weise die Tonskala mehrere Male durchprüft, so müsste sich ein Simulant für jeden Ton dessen Stärke merken, bei dem er ihn angeblich vorher gehört hat. Und wenn man ausserdem die Töne nicht der Reihe nach benutzt, sondern willkürlich bald hohe, bald tiefe Töne nimmt, so dürfte es kaum einen Menschen geben, der hier eine Simulation zustande brächte. Derjenige aber, der wirklich Gehörfehler besitzt, wird jeweils die gleichen oder doch nahezu die gleichen Angaben machen. Um aber den zu Prüfenden auch von unwillkürlichen Einflüssen, wie die Bedienung der Regulierwiderstände, das Laufen des Motors usw., unabhängig zu machen, setzt man ihn am besten ganz getrennt von den eigentlichen Apparaten in einen besonderen Raum. Er bekommt nur den Telephonhörer an das Ohr und ausserdem den Druckknopf einer Klingelleitung, die zu dem prüfenden Arzte führt. Er hat dann jeweils, wenn er einen Ton hört, auf den Knopf zu drücken. Der Kontrolle wegen kann der prüfende Arzt ebenfalls einen Telephonhörer an sein Ohr nehmen, der mit dem anderen in Serie geschaltet ist.

Auf diese Weise wird man zu einer einwandfreien Prüfung und Messung der Hörfähigkeit oder Hörschwelle gelangen.